干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

巴基斯坦干旱特征及其风险评估

朱淑珍[1,2,3]， 黄法融[1,2,4,5]， 李兰海[1,2,3,4,5]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 中国科学院伊犁河流域生态系统研究站，新疆 新源 835800；3. 中国科学院大学，北京 100049；
4. 新疆干旱区水循环与水利用重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；5. 中国科学院中亚生态与
环境研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要：干旱深刻影响着巴基斯坦的水资源、粮食产量和社会经济格局，分析当地的干旱特征及其风险对其社会发展具有重要意义，但当前鲜有学者从长期视角分析整个巴基斯坦的干旱特征或评估该地区的干旱灾害风险。通过采用1982—2013年第三代归一化植被指数（Global inventory modelling and mapping studies normalized difference vegetation index，GIMMS NDVI3g）数据集构建植被状态指数（Vegetation condition index，VCI），分析了32 a巴基斯坦干旱范围和频率；采用由干旱频率、牲畜、土壤、作物、灌溉面积等资料表征的危险性、脆弱性、暴露度和防灾减灾能力对巴基斯坦干旱风险进行了评估。结果表明：（1）研究时段内，各月多年平均干旱范围存在差异，1月和9—12月干旱范围较大（面积比例大于40%）；5—8月干旱范围较小（面积比例小于30%）；5—6月受升温和降水减少影响，干旱面积有上升趋势。（2）研究区5—8月干旱频率较低，西部山区林地、草地9月干旱频率较高，东部平原1月和9—12月干旱频率较高。（3）巴基斯坦干旱风险空间格局主要由干旱频率、作物产量、大牲畜比例、土壤持水能力决定，其中干旱频率对区域干旱风险的影响最大。在牲畜比例和土壤持水性的分别作用下，巴基斯坦北部山区向平原过渡的地带和东南部自然植被覆盖地区干旱风险较高；受灌溉影响，地形平坦的河谷地区干旱风险较低；北部山区自然植被覆盖度高，干旱风险也较低。研究结果有益于巴基斯坦灾害风险管理。

关 键 词：干旱；风险评估；归一化植被指数（NDVI）；植被状态指数（VCI）；巴基斯坦
文章编号：

干旱作为众多自然灾害的1种，与火山、地震、洪涝、飓风等典型突发性自然灾害相比，其发生具有渐进性和潜在性，且持续时间长[1]。严重且持续的干旱将造成土地荒漠化、河水断流等现象，从而导致农业减产，制约社会经济发展[2-3]。近年来，巴基斯坦气温上升，季风降水量减少，作物需水不断增长，作物需水量已经超过了有效降水量，导致干旱灾害频发，严重制约当地农业的发展[4]。在全球气候变暖背景下，对巴基斯坦干旱特征及其风险进行分析，具有重要的现实意义，将有益于该地区灾害风险管理、农业生产、社会经济可持续发展和生态环境建设[5-6]。

遥感对旱情监测具有实时、灵活性强、覆盖面广等优点。近几十年来，许多学者利用遥感技术对不同地区的干旱展开了研究。如Lu等[7]基于1981—2013年植被覆盖指数（Global inventory modelling and mapping studies advanced very high resolution radiometer normalized difference vegetation index，GIMMS AVHRR NDVI）长时间序列数据集，综合北美区域再分析（North American regional reanalysis，NARR）的地表温度、降水、土壤含水量等数据，开发了综合干旱指数（Integrated scaled drought index，IS-

收稿日期：2020-05-30； **修订日期**：2020-10-26
基金项目：新疆维吾尔自治区自然科学青年基金（2017D01B52）资助
作者简介：朱淑珍（1995-），女，硕士研究生，主要从事积雪水文研究. E-mail: zhushuzhen19@mails.ucas.ac.cn
通讯作者：黄法融（1985-），女，助理研究员，主要从事生态水文研究. E-mail: huangfr@ms.xjb.ac.cn

DI),对美国的干旱分布情况进行了分析;Zhang等[8]利用印度1981—2013年月尺度GIMMS NDVI,获得了植被状态指数(VCI)时间序列,研究了印度地区干旱持续时间、频率、范围和严重程度的发展趋势,并建立了作物产量异常与干旱之间的关系。也有学者将遥感运用到巴基斯坦干旱研究中,如Shah等[9]利用1998—2014年的MODIS NDVI数据生成干旱指数(Standardized vegetation index,SVI),对巴基斯坦Tharparkar地区的干旱严重程度进行了时空分析。除遥感数据外,Adnan等[10]还基于全球气候中心的降水数据以及气候预测中心1951—2010年间的土壤湿度数据,利用区域干旱识别模型分别对巴基斯坦Sindh省3个月、6个月、9个月、12个月、24个月的标准化降水指数(Standardized precipitation index,SPI)进行了计算,利用SPI分析了该地区的干旱特征。巴基斯坦纬度跨度大,气候地形条件不一,区域空间差异大,但当前大部分工作侧重于巴基斯坦部分地区的干旱监测以及干旱时空分析,缺乏对整个巴基斯坦干旱的长期视角研究分析,且没有从灾害风险角度来评估巴基斯坦干旱灾害风险。

鉴于此,本文采用1982—2013年GIMMS NDVI3g长时间序列数据集获取VCI,在利用VCI对巴基斯坦干旱特征进行分析的基础上,通过干旱频率、作物种植面积比例、灌溉比例、作物产量、田间持水量、人口密度、大畜牲比例等资料,构建巴基斯坦干旱危险性、脆弱性、暴露度以及人类防灾减灾能力等干旱风险性指标,建立干旱风险评估模型,对巴基斯坦全域进行干旱风险评估,以期为巴基斯坦自然灾害风险防控与减灾对策的制定提供科学依据。

1 研究区概况

巴基斯坦地处南亚,地理范围为60°~80°E、23°~37°N,总面积88×10^4 km^2(包括巴控克什米尔地区)。从来源于美国地质测量局(USGS)的GTOPO30数字高程图(图1a)可以看出,巴基斯坦多山地、丘陵,北部为山地、高原,地势较高,西部为山地,中部、南部为平原。由于地貌条件复杂,南北纬度跨度大,巴基斯坦气候种类较多,北部为亚热带气候和高山气候,西南部为热带沙漠气候,东南部为热带季风气候。巴基斯坦区域平均年降水量不足250 mm,1/4地区降水量在120 mm以下;特别是夏季,受副高控制,气候炎热干燥,降水较少。根据ESA CCI 2010土地覆盖数据(http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/),巴基斯坦土地覆盖类型(图1b)主要包括灌溉农田、草地、林地、荒漠等,面积比例分别为22%、24%、12%、27%,农田主要位于东部、南部河谷地区,荒漠主要位于西部Balochistan省境内。巴基斯坦土壤质地类型[11](图1c)主要包括砂土、壤砂土、粉壤、壤土、黏壤、粉黏壤等,农田地区以壤土、粉黏壤、黏壤为主、粉壤为主,荒漠地区以砂土和壤砂土为主。巴基斯坦人口自然增长率为1.55%,根据文献图集[11]中1998年人口分布和该增长率,获得2010年巴基斯坦人口分布(图1d)。从图中可以看出,巴基斯坦人口主要分布于中东部的Sindh省、Punjab省、Khyber-Pakhtunkhwa省等地。

2 数据与方法

本研究利用由遥感植被指数得到的干旱指数分析巴基斯坦干旱,并在评估再分析气象数据的基础上,利用再分析数据研究干旱驱动因子。此外,本研究将利用田间持水量、灌溉面积比例、人口密度、大牲畜比例、作物种植面积比例、干旱频率、作物(小麦、玉米、水稻、棉花)产量等数据进行干旱风险性指标因子计算,评估巴基斯坦干旱风险。

2.1 数据

2.1.1 遥感植被指数 NDVI数据能够很好的反映植被的季节和年变化[12],在全球和区域植被变化及干旱监测中得到广泛应用[13-17]。本研究利用1982—2013年GIMMS NDVI3g长时间序列数据集分析巴基斯坦干旱,该数据时间分辨率为15 d,空间分辨率为0.0833°(http://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g.v0/),采用Lambert等积方位投影,利用最近邻法内插重采样至8 km。再利用最大值合成法得到月NDVI,进一步降低大气残余效应及双向传输效应的影响[18]。

2.1.2 气象数据 本研究中的气象数据包括再分析资料与气象站实测资料。再分析资料来源于由欧洲中期数值预报中心再分析数据(ERA-Interim)经海拔和月尺度实测数据矫正[19]得到的时间分辨率为1 d,空间分辨率为0.5°的全球实测气候数据集(http://www.waterandclimatechange.eu/about/watch-forc-

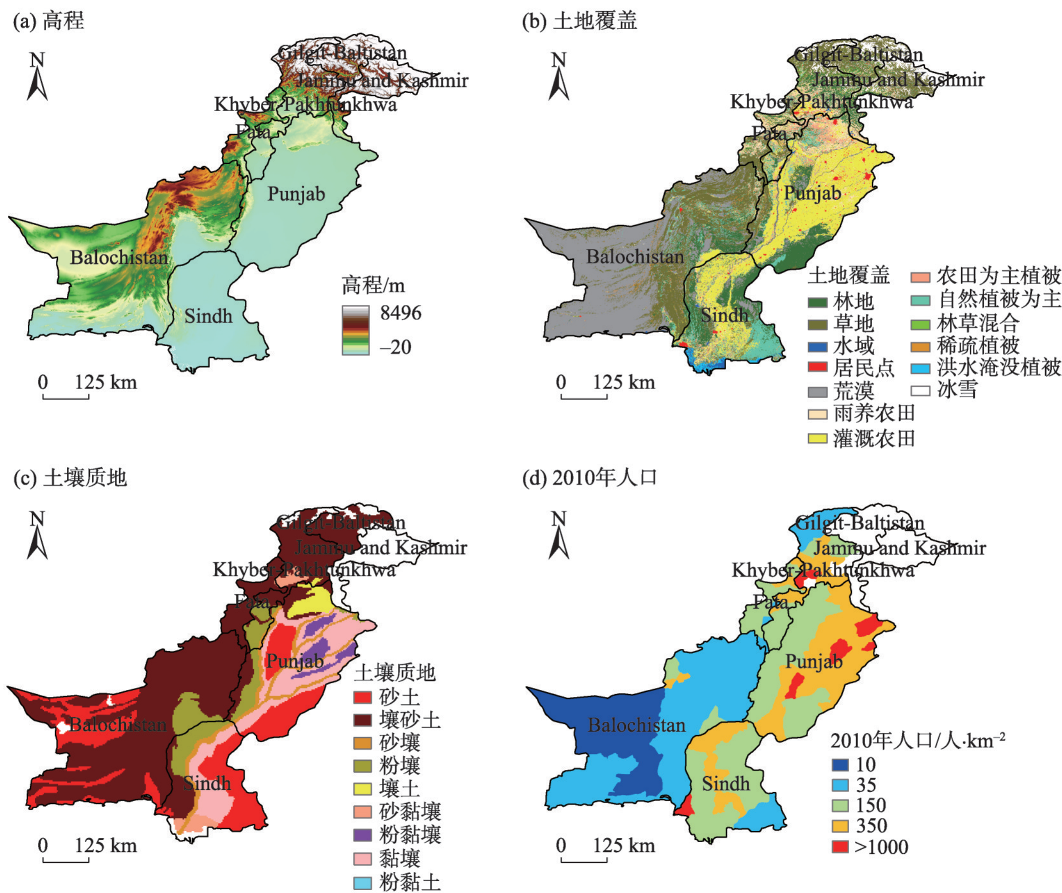


图1 巴基斯坦概况示意图

Fig. 1 General situation of Pakistan

ing-data-20th-century)，实测资料(来源于NOAA观测台站数据，http://ftp.ncdcnoaa.gov/pub/data/gsod/)包括研究时段内资料相对完整的巴基斯坦10个气象站点(图2a和2c)的气温和降水数据。在利用ERA-Interim再分析数据研究巴基斯坦干旱之前，本研究将采用站点周围栅格面积加权平均法[20]评估数据集在该地区的精度。利用实测资料对再分析数据的评估表明，再分析气温和降水能够反映各站点实际月均温(图2a)和月降水(图2c)的变化(相关系数大于0.48，通过了5%水平显著性检验)，且对气温的重现性能强于降水，再分析数据也能够反映区域平均月均温(图2b)和月降水(图2d)的变化(决定系数大于0.9)。

2.1.3 *农业数据* 为了分析研究区内的干旱风险，还利用了作物种植面积比例、作物综合产量(作物种植面积比例加权平均作物单产)、灌溉面积比例、大畜牲比例等数据(来源于巴基斯坦国家统计局及文献图集[11])。从图3可以看出，巴基斯坦作物种植区主要位于东部的Punjab省、Sindh省以及首都Islamabad附近。巴基斯坦主要种植棉花、小麦、水稻、玉米等，棉花–小麦为主要作物种植模式。作物产量较高地区主要位于东南部的Punjab省和Sindh省，两省作物综合产量分别为2890 kg·hm^{-2}和3889 kg·hm^{-2}，其中Punjab省小麦产量为2694 kg·hm^{-2}，水稻产量为1842 kg·hm^{-2}，玉米产量为4916 kg·hm^{-2}，棉花产量为3935 kg·hm^{-2}，Sindh省小麦、水稻、玉米、棉花作物产量分别为3432 kg·hm^{-2}、3458 kg·hm^{-2}、629 kg·hm^{-2}、5304 kg·hm^{-2}。巴基斯坦灌溉面积比例较大(>80%)的地区主要位于Punjab中东部。由于西部地区为草地和荒漠，适合小牲畜，东部地区为林地和农田，适合大牲畜(牛)，因此小牲畜(羊)主要位于西部地区，大畜生主要位于东部及北部地区。这些数据主要用于干旱脆弱性、干旱暴露度、人类防灾减灾能力等指标的计算，从而构建巴基斯

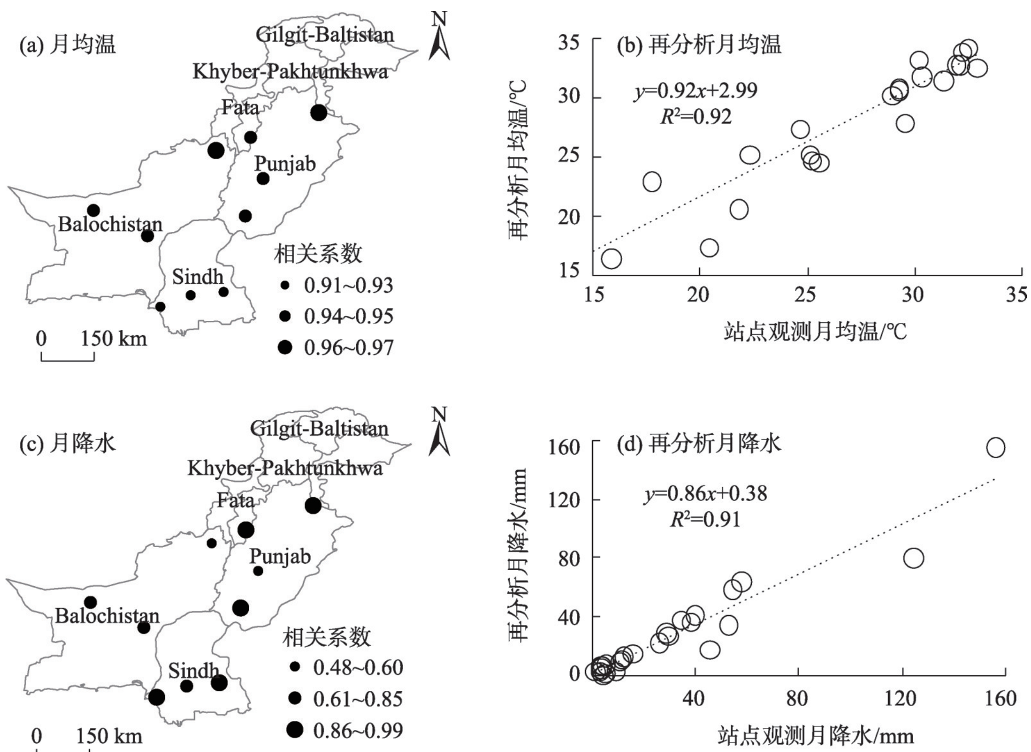


图2 再分析月均温和降水评估

Fig. 2 Evaluation of ERA-Interim temperature and precipitation at the monthly time scale

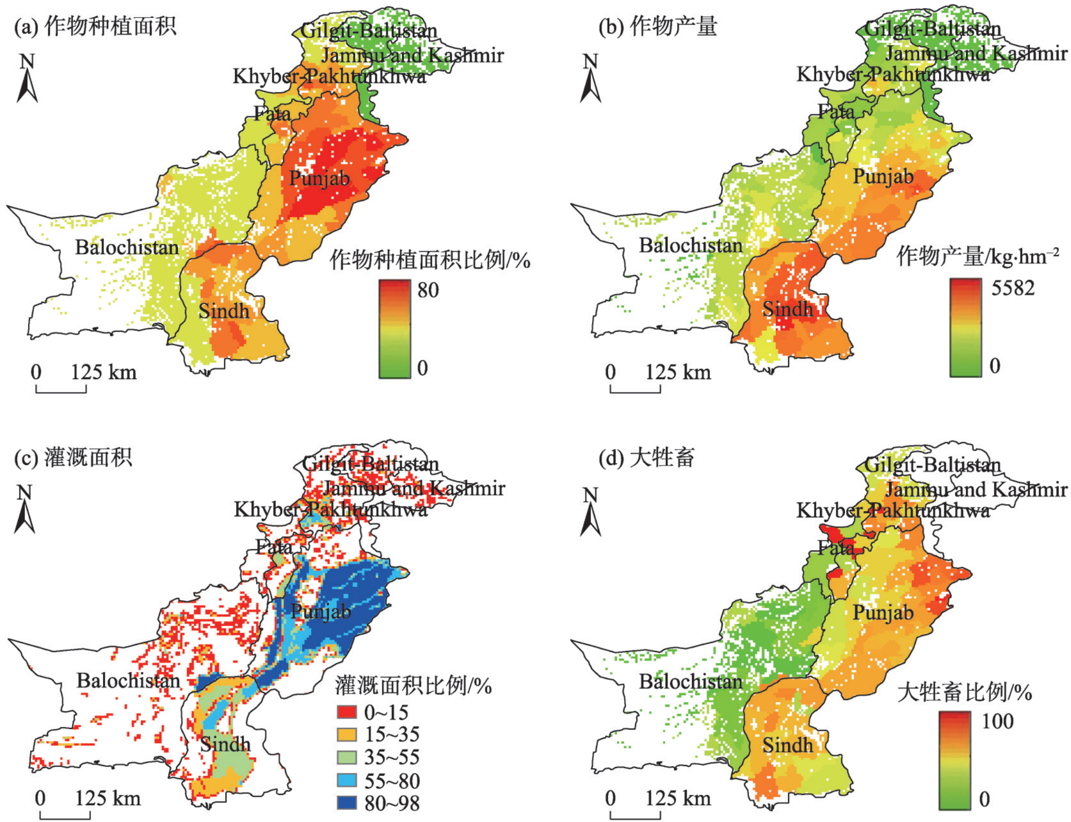


图3 巴基斯坦农业示意图

Fig. 3 Pakistan agricultural information

坦的干旱灾害风险性指数。

2.2 方法

2.2.1 干旱监测指数 在众多干旱监测指数中，植被状态指数(VCI)能够反映植被生长状况，在干旱监测中应用较为广泛[21-25]，因此本研究将利用VCI对巴基斯坦干旱进行监测。VCI计算公式如下所示：

$$VCI_j = \frac{NDVI_j - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (1)$$

式中：$NDVI_j$为某年时期的NDVI值；$NDVI_{max}$、$NDVI_{min}$分别为1982—2013年时期j的NDVI最大值和最小值。

VCI指数越小表明干旱程度越大，本研究采用Kogen在文献[26]中报道的0.35作为阈值判断干旱是否发生，即VCI≤0.35时干旱发生，VCI>0.35时干旱不发生。基于干旱发生的栅格数，计算区域干旱面积占比。

2.2.2 干旱风险评估方法 干旱灾害风险由致灾因子危险性(P_{dry})、承载体脆弱性(E_{dry})、孕灾环境暴露度(V_{dry})、人类防灾减灾能力(A_{dry})4部分构成[27-29]，本研究假设各种因素对干旱风险的贡献相等，干旱灾害风险指数R_{dry}由下式计算：

$$R_{dry} = Stand(P_{dry}) \times E_{dry} \times V_{dry} \times (1 - A_{dry}) \quad (2)$$

本研究基于干旱发生频率进行干旱危险性评估，计算方法[11]如下：

$$P_{dry} = \frac{n_{dry}}{N_{year}} \quad (3)$$

式中：N_{year}为总年数；n_{dry}为发生干旱的年数；P_{dry}高表明干旱危险性高，低则表明干旱危险性低。

考虑到在巴基斯坦所有作物中，小麦种植范围最广[11]，而小麦产量与2月NDVI密切相关[30]，本研究利用2月NDVI获取P_{dry}；并利用如下标准化函数Stand对P_{dry}等变量进行标准化。

$$Stand(X) = 0.5 + 0.5 \times \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (4)$$

式中：X_{min}、X_{max}为研究区变量X的最小值和最大值。

承载体脆弱性(E_{dry})计算方法如下：

$$E_{dry} = Stand(DA_{dry}) \times Stand(Soil_{dry}) \quad (5)$$

$$Soil_{dry} = \frac{\theta - \theta_{min}}{\theta_{max} - \theta_{min}} \quad (6)$$

式中：DA_{dry}为大牲畜比例(%)；$Soil_{dry}$为标准化的土壤田间持水量；θ为土壤田间持水量(%)，根据土壤质地资料获取[31]，θ_{max}和θ_{min}分别为研究区最大和最小田间持水量(%)。

孕灾环境暴露度(V_{dry})计算方法如下：

$$V_{dry} = Stand(R_{cultivated}) \times Stand(PD_{dry}) \times Stand(Yield_{dry}) \quad (7)$$

$$PD_{dry} = \frac{PD - PD_{min}}{PD_{max} - PD_{min}} \quad (8)$$

$$Yield_{dry} = \frac{Yield - Yield_{min}}{Yield_{max} - Yield_{min}} \quad (9)$$

式中：$R_{cultivated}$为作物种植百分比(%)；PD_{dry}为标准化的人口密度(人·km^{-2})；PD为人口密度(人·km^{-2})；PD_{min}、PD_{max}分别为研究区最小、最大人口密度(人·km^{-2})；$Yield_{dry}$为标准化的综合粮食产量(kg·hm^{-2})；Yield为某地区综合粮食产量(kg·hm^{-2})；$Yield_{min}$、$Yield_{max}$分别为研究区最小、最大综合粮食产量(kg·hm^{-2})。

人类防灾减灾能力A_{dry}计算方法如下：

$$A_{dry} = Stand(R_{irr}) \quad (10)$$

式中：R_{irr}代表灌溉面积比例(%)。

3 结果与分析

3.1 巴基斯坦月尺度干旱范围及影响因子

如图4所示，巴基斯坦在1982—2013年，1月和9—12月干旱面积比例大于40%，12月干旱面积比例为全年最高(面积比例45%)；5—8月干旱面积比例较小，6月干旱面积全年最小，比例小于30%。通过偏相关系数分析，各月干旱面积比例与各月气温、降水的偏相关系数分别为0.69、0.74，分别通过了5%、1%水平显著性检验，说明干旱范围同时受气温和降水的影响，但降水的影响程度大于气温。

1982—2013年，巴基斯坦各月干旱面积比例变

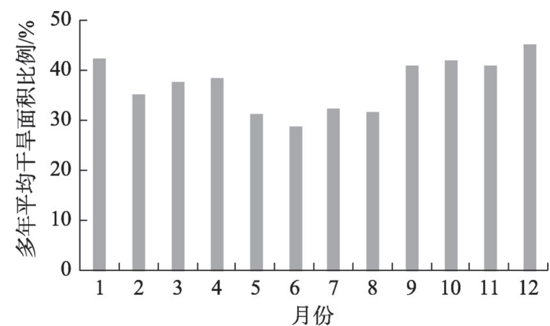


图4 巴基斯坦1982—2013多年平均各月干旱面积比例

Fig. 4 Average proportion of dry areas in each month in Pakistan during 1982—2013

化不一(图5)。5—6月干旱面积比例呈1%水平显著上升,5月上升速率最大,6月次之。造成该现象的主要原因是温度显著上升,但降水呈下降趋势,温度升高和降水减少导致5—6月干旱影响范围扩大。其中6月是干旱面积比例最小月(图4),干旱面积的扩大意味着6月干旱状况加重,这将导致巴基斯坦旱灾加剧。1月和2月干旱面积分别在1%和5%水平上呈显著下降,其中1月下降速率较大;其余月干旱面积比例变化不显著。

为分析1月干旱面积比例变化原因,分析了1月VCI的变化。从图6可以看出,1982—2013年巴基斯坦1月VCI呈明显上升趋势的地区主要位于Punjab省,说明Punjab省干旱程度减小,且干旱程度减小的面积呈扩大趋势。因此,巴基斯坦1月干旱面积显著减少主要源于Punjab省干旱面积的缩减。根据已有报道[32-35],1980年以来,Punjab省冬季地表供水量呈减少趋势,灌溉所用地下水开采量呈上升趋势[36],考虑到1月之前有2次灌溉,说明地下水开采量的增加使得Punjab省1月干旱面积显著减少。

3.2 巴基斯坦干旱频率

由图7和土地覆盖空间分布图可以看出,1982—2013年巴基斯坦西部山区林地、草地9月干旱频率较高,将影响当地生态环境;1月和9—12月,东部平原降水较少,干旱频率较高,且这些月多年平均干旱面积比例较大,考虑到东部平原作物种植面积比例大,干旱将影响该地区作物产量。此外,9月干旱频率较高的范围最广,主要分布于西部山区向东部平原区过渡带,将导致东部平原区西侧生态环境脆弱,影响东部作物生长。5—8月为巴基斯坦的夏季,受季风降水影响,全境干旱频率较低,有利于当地社会经济生产活动。

3.3 巴基斯坦干旱风险评估

从图8可以看出,1982—2013年巴基斯坦干旱风险较高的地区位于北部山区向平原过渡的地带以及东南部自然植被覆盖地区;干旱风险较低的地区主要位于地形平坦的中东部河谷地区以及北部山区。对整个巴基斯坦而言,干旱风险空间格局与

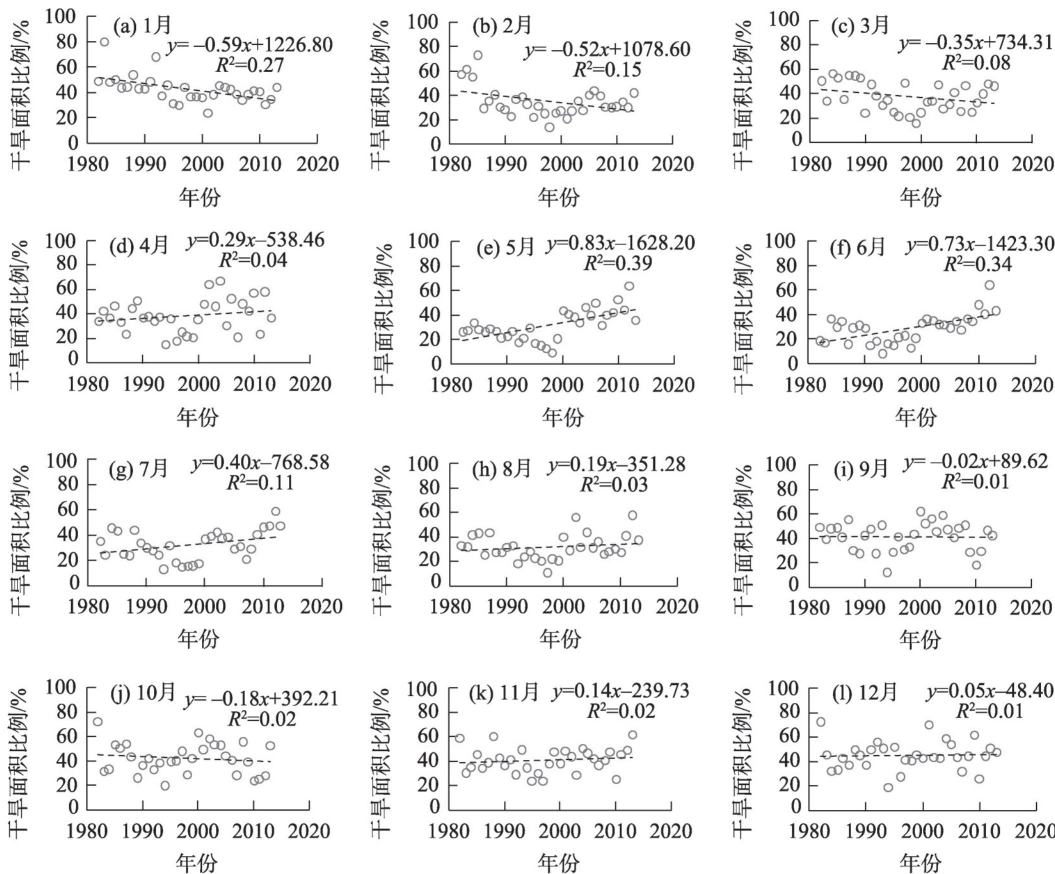


图5 1982—2013年各月干旱面积比例变化

Fig. 5 Variation of proportion of dry areas in Pakistan in each month during 1982—2013

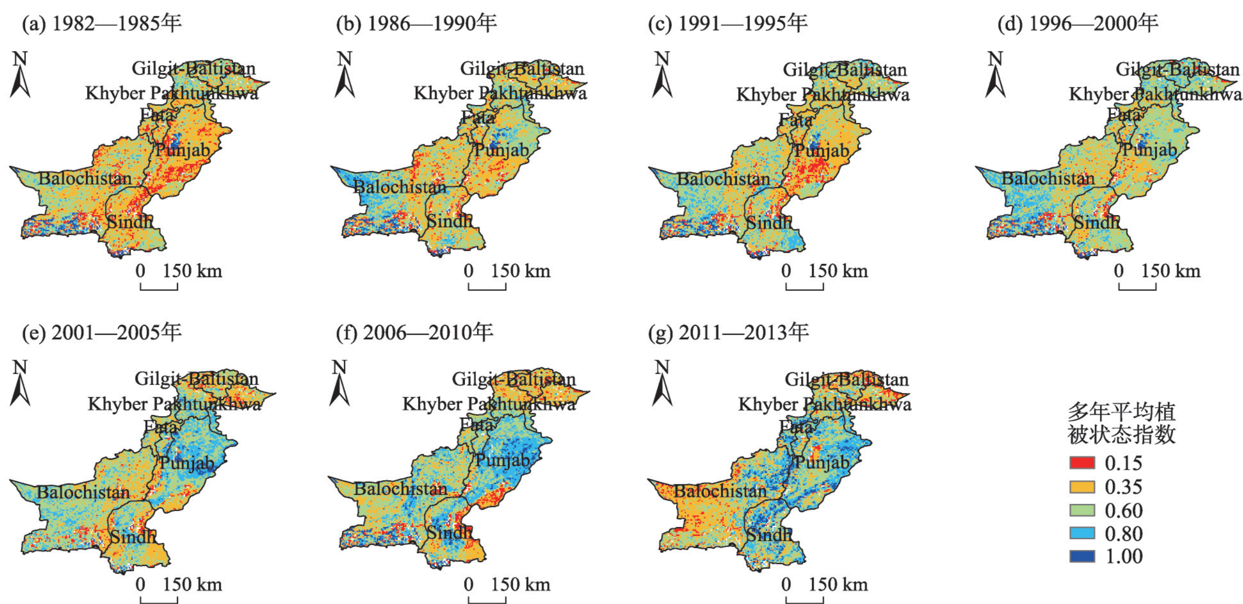


图6 巴基斯坦1月多年平均植被状态指数(VCI)

Fig. 6 Pakistan's multi-year average vegetation condition index (VCI) in January

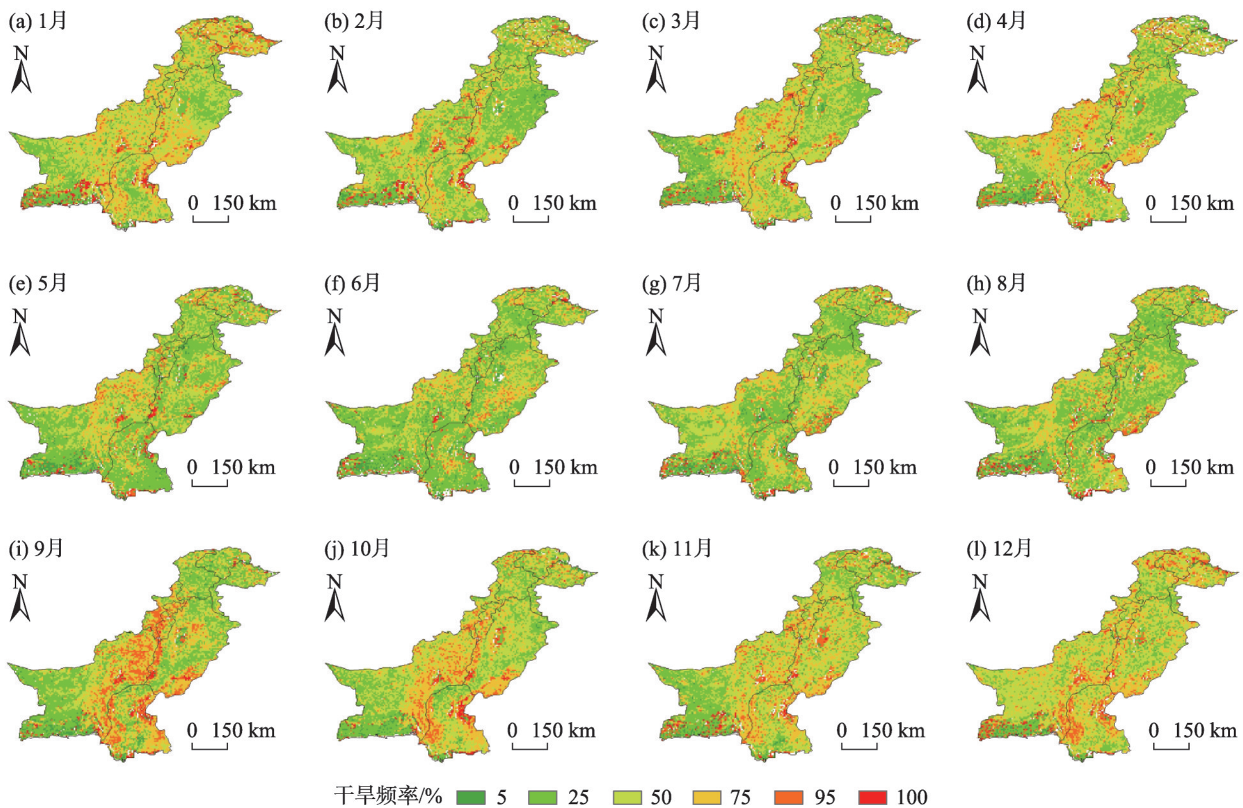


图7 基于VCI的巴基斯坦1982—2013年各月干旱频率

Fig. 7 Drought frequency of each month in Pakistan during 1982—2013 based on VCI

干旱脆弱性、危险性空间格局相似,特别是干旱脆弱性。但干旱风险空间格局与干旱暴露度空间格局相差较大,特别是东部的Punjab和Sindh省,以及西部的Balochistan省,干旱风险较低,但干旱暴露度高。根据偏最小二乘法获得的各因素重要性指标(Variable importance index,VIP),巴基斯坦干旱风

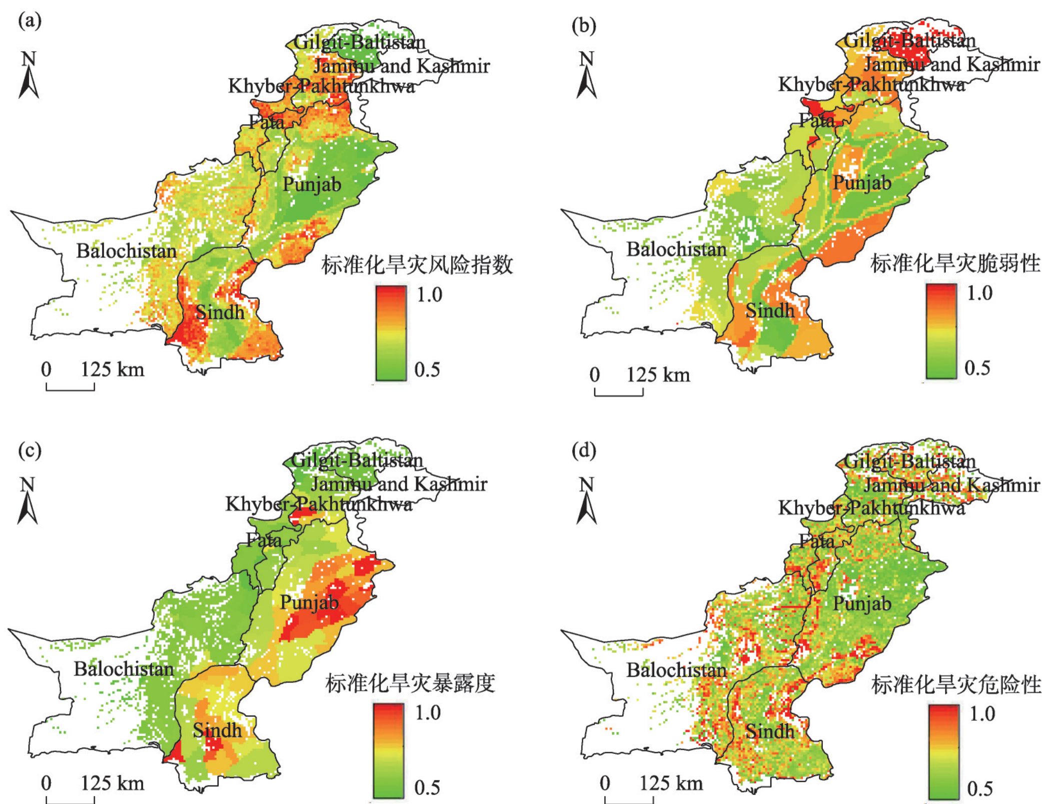
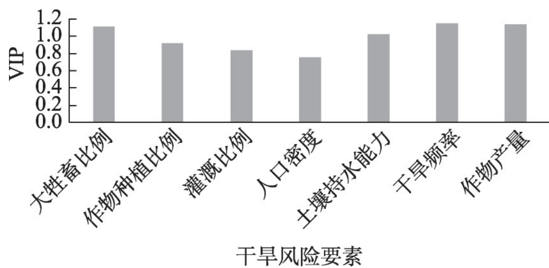


图8 1982—2013年巴基斯坦干旱风险

Fig. 8 Drought risk in Pakistan during 1982—2013

险空间格局主要由干旱频率、作物产量、大牲畜比例、土壤持水能力(VIP>1)决定(图9),其中干旱频率对干旱风险的影响最大。

分析表明,在北部山区,自然植被覆盖度较高,作物产量低,导致干旱风险性和干旱暴露度均较低(图8a、c);但该地区土壤质地为壤砂,导致干旱脆弱性较高,需开展水土保持工作。在北部山区向平原过渡的地区,大牲畜比例较高,导致干旱风险和



注:VIP为各要素重要性指标。

图9 基于偏最小二乘法的巴基斯坦干旱风险要素重要性指标(VIP)

Fig. 9 Variable importance index (VIP) of drought risk elements in Pakistan based on partial least square method

干旱脆弱性均较高(图8a~b),需适度放牧或减少大牲畜数量。在东南部自然植被区,土壤质地为砂土或壤砂土,土壤持水能力较低,导致干旱脆弱性较高,同时该地区干旱频率较高,导致干旱危险性较高,较高的脆弱性和危险性使该地区干旱风险较高,为降低该地区干旱风险并改善生态环境质量,需增加生态环境配水,开展水土保持工作。在各因素的综合作用下,中西部干旱风险处于中间水平,考虑到该地区以自然植被为主,土壤质地为砂土或壤砂土,土壤持水能力较低,也需进行水土保持[37-40]。在地形平坦的中东部河谷地区,如Punjab省中东部、Sindh省中部,作物产量较高,导致干旱暴露度较高;风险和干旱危险性都较低(图8a、d),因为该地区靠开采地下水维持较高的灌溉面积比例,但是开采地下水将消耗大量的能量,超采的地下水将引起盐渍化,导致环境退化。印度河是巴基斯坦重要的地表灌溉水源,在气候变化和人类活动影响下,位于印度河下游的巴基斯坦中东部河谷地区获得的水资源量逐渐减少,从可持续发展的角度,相关部门需加强印度河流域尺度的水资源管理,改善河道

沿岸各用水机构对地表水的管理,使目前分配不到地表水用户的农业生产力上升,从而提高水土、能量的利用效率,以应对下游地下水日益减少将引发的环境退化及高干旱风险[41]。

4 讨 论

当前大部分研究只是针对巴基斯坦干旱较为严重的部分区域展开干旱特征分析,没有对巴基斯坦全国展开干旱分析,且没有对巴基斯坦展开干旱灾害风险分析。如Shah等[9]和Adnan等[10]均对巴基斯坦Sindh省干旱状况展开研究,研究结果均表明Sindh省干旱频率高,干旱状况严重,尤其是Sindh省东南部干旱程度较高,这与本文的干旱风险空间格局是一致的。但由于数据、方法和研究区范围的差别,研究结果也存在一定的差异。Shah等[9]认为由于Sindh省高度依赖季风降水,季风降水的不足导致干旱的发生,且在季风季节,北部降水比南部少,北部比南部更容易遭受干旱,因此Sindh省北部干旱频率高于南部。但从本文各月干旱频率空间分布(图7)和干旱风险分布(图8)来看,Sindh省南北干旱频率差别不大,这可能与本文充分考虑到灌溉影响有关。值得一提的是,Adnan等[10]在研究气温、降水和干旱的相关性时提到了土壤持水性和地表水灌溉对巴基斯坦农业的影响,但并没有展开分析。本文采用时间和空间尺度较大的GIMMS NDVI长时间序列数据集,将遥感数据与社会经济资料相结合,综合考虑干旱频率、作物产量、大牲畜比例、土壤持水能力、灌溉等因素对干旱的影响,对巴基斯坦全国1982—2013年展开长时间尺度的干旱特征及风险研究,分析了巴基斯坦全国干旱及其风险影响因素,为巴基斯坦干旱监测以及灾害管理机构提供了有用的参考。

本研究收集的统计资料有限,且由于实测气象数据缺乏,所用再分析资料以及干旱指数在研究中存在的问题,将在一定程度上影响研究结果的准确性。因此该研究仅在现有数据的基础上,对巴基斯坦长时间尺度的干旱风险进行评估,为巴基斯坦自然灾害风险防控和减灾对策提供依据。在未来的研究中,考虑利用时间序列更加完善的统计、实测数据等,研究巴基斯坦干旱风险时空变化,为未来气候变化下巴基斯坦干旱风险管理提供更加完备的科技支撑。

5 结 论

为了加强巴基斯坦干旱灾害风险管理,促进当地社会经济发展,本文利用1982—2013年GIMMS NDVI数据集,计算植被状态指数(VCI),采用VCI研究区域干旱时空变化特征,并通过VCI获取干旱危险性,利用作物产量、作物种植面积等统计资料获取干旱暴露度、脆弱性等指标,进而基于自然灾害风险理论,对巴基斯坦干旱灾害风险进行空间分析,得到以下结论:

(1) 1982—2013年,受气温和降水的影响,巴基斯坦大部分月份干旱面积比例均在30%以上,干旱范围大。各月干旱面积比例变化不一,5—6月干旱面积比例显著上升,1—2月干旱面积比例显著下降,其余月份变化不显著。由于开采地下水进行灌溉,Punjab省1月干旱程度减弱,成为该月巴基斯坦干旱面积比例下降的重要原因。

(2) 根据干旱频率表征的干旱危险性,西部山区林地、草地9月干旱危险性较高,东部平原1月、9—12月干旱危险性较高,这些月同时为多年平均干旱面积比例较大的月。

(3) 由危险性、脆弱性、暴露度和人类防灾减灾能力得到干旱风险评估结果表明,巴基斯坦干旱风险较高的地区位于北部山区向平原的过渡地带以及东南部自然植被覆盖的地区,干旱风险间格局主要受干旱频率、作物产量、大牲畜比例、土壤持水能力影响。

GIMMS NDVI3g是已知最长时间序列的NDVI数据集[42-43],且具有稳定性,对干旱监测的连续性较好。本文将该遥感资料与社会经济资料相结合,从灾害风险的角度分析和评估了巴基斯坦的干旱灾害,较为全面的反映了自然和人为因素作用下的巴基斯坦干旱风险分布。本研究是目前针对巴基斯坦全境最长时间跨度的干旱特征研究,且评估了当前学者尚未涉及的巴基斯坦干旱风险,为巴基斯坦干旱灾害风险管理提供了有益参考。

参考文献(References)

[1] 陈丙寅, 杨辽, 陈曦, 等. 基于改进型TVDI在干旱区旱情监测中的应用研究[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 902-913. [Chen Bingyin, Yang Liao, Chen Xi, et al. Application of modified TVDI in drought monitoring in arid areas[J]. Arid Land Geography, 2019,

42(4): 902−913.]

[2] 张强, 张良, 崔显成, 等. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 763−778. [Zhang Qiang, Zhang Liang, Cui Xiancheng, et al. Progresses and challenges in drought assessment and monitoring[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(7): 763−778.]

[3] 沙莎, 郭铌, 李耀辉, 等. 植被状态指数VCI与几种气象干旱指数的对比——以河南省为例[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 990−998. [Sha Sha, Guo Ni, Li Yaohui, et al. Comparison of the vegetation condition index with meteorological drought indices: A case study in Henan Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(4): 990−998.]

[4] Adnan S, Uliah K, Gao S, et al. Shifting of agro-climatic zones, their drought vulnerability, and precipitation and temperature trends in Pakistan[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(Suppl. 1): 529−543.

[5] 冯冬蕾, 程志刚, 赵雷, 等. 4种干旱判别指数在东北地区适用性分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 371−379. [Feng Donglei, Cheng Zhigang, Zhao Lei, et al. Applicability analysis of four drought indexes in northeast China[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 371−379.]

[6] 邹磊, 余江游, 夏军, 等. 基于SPEI的渭河流域干旱时空变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 329−338. [Zou Lei, Yu Jiangyou, Xia Jun, et al. Temporal-spatial variation characteristics of drought in the Weihe River Basin based on SPEI[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 329−338.]

[7] Lu J, Carbong G J, Gao P. Mapping the agricultural drought based on the long-term AVHRR NDVI and north American regional reanalysis(NARR) in the United States, 1981—2013[J]. Applied Geography, 2019, 104: 10−20.

[8] Zhang X, Obringer R, Wei C, et al. Droughts in India from 1981 to 2013 and implications to wheat production[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 44552, doi: 10.1038/srep44552.

[9] Shah S U, Iqbal J. Spatial-temporal variations of vegetation and drought severity across Tharparkar, Pakistan, using remote sensing-derived indices[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2016, 10(3): 036005, doi: 10.1117/1.JRS.10.036005.

[10] Adnan S, Uliah K, Gao S. Characterization of drought and its assessment over Sindh, Pakistan during 1951—2010[J]. Journal of Meteorological Research, 2015, 29(5): 837−857.

[11] Khan F K. Oxford school atlas for Pakistan[M]. Oxford: Oxford University Press, 2008.

[12] Kern A, Marjanovic H, Barcza Z. Evaluation of the quality of NDVI3g dataset against collection 6 MODIS NDVI in central Europe between 2000 and 2013[J]. Remote Sensing, 2016, 8(11): 955, doi: 10.3390/rs8110955.

[13] 蔡斌, 陆文杰, 郑新江. 气象卫星条件植被指数监测土壤状况[J]. 国土资源遥感, 1995(4): 45−50. [Cai Bin, Lu Wenji, Zheng Xinjiang. Using meteorological satellite's VCI to monitor soil state [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 1995(4): 45−50.]

[14] Unganai L S, Kogan F N. Drought monitoring and corn yield estimation in southern Africa from AVHRR data[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 63(3): 219−232.

[15] Fensholt R, Horion S, Tagesson T, et al. Global-scale mapping of changes in ecosystem functioning from earth observation-based trends in total and recurrent vegetation[J]. Global Ecology and Biogeography, 2015, 24: 1003−1017.

[16] Xu C, Liu H, Wiliams A P, et al. Trends toward an earlier peak of the growing season in northern Hemisphere mid-latitudes[J]. Global Change Biology, 2016, 22: 2852−2860.

[17] Zeng F W, Collatz G J, Pinzon J E, et al. Evaluating and quantifying the climate-driven interannual variability in global inventory modeling and mapping studies(GIMMS) normalized difference vegetation index(NDVI3g) at global scales[J]. Remote Sensing, 2016 (5): 3918−3950.

[18] Piao S, Mohammat A, Fang J, et al. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China[J]. Global Environmental Change, 2006, 16(4): 340−348.

[19] Weedon G P, Gomes S, Viterbo P. The WATCH forcing data 1958—2001: A meteorological forcing dataset for land surface and hydrological models[R]. Watch Technical Report, 2010.

[20] Rigden A J, Salvucci G D, Dara E, et al. Partitioning evapotranspiration over the continental United States using weather station data [J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45: 9605−9613.

[21] Kogan F, Sullivan J. Development of global drought watch system using NOAA/AVHRR data[J]. Advances in Space Research, 1993, 13(5): 219−222.

[22] Kogan F. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1995, 76(5): 655−668.

[23] Bajgiran P R, Daevishsefat A A, Khalili A, et al. Using AVHRR-based vegetation indices for drought monitoring in the northwest of Iran[J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72(6): 1086−1096.

[24] Kuri F, Murwira A, Murwirs K S, et al. Predicting maize yield in Zimbabwe using dry dekads derived from remotely sensed vegetation condition index[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 33(12): 39−46.

[25] 李维娇, 王云鹏. 基于VCI的2003—2017年广东省干旱时空变化特征分析[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2020, 52(3): 85−91. [Li Weijiao, Wang Yunpeng. An analysis of the spatial-temporal characteristics of drought in Guangdong based on vegetation condition index from 2003 to 2017[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2020, 52(3): 85−91.]

[26] Kogan F. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1995, 76(5): 655−668.

[27] 张继权, 李宁. 主要气象灾害风险评价与管理的数量化方法及其应用[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2007. [Zhang Jiquan,

Li Ning. Quantitative methods and applications of risk assessment and management on main meteorological risks[M]. Beijing: Beijing Normal University Publishing House, 2007.]

[28] 葛全胜, 邹铭, 郑景云, 等. 中国自然灾害风险综合评估初步研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008. [Ge Quansheng, Zhou Ming, Zheng Jingyun, et al. Integrated assessment of natural disaster risk in China[M]. Beijing: Science Press, 2008.]

[29] 姚玉璧, 张强, 李耀辉, 等. 干旱灾害风险评估技术及其科学问题与展望[J]. 资源科学, 2013, 35(9): 1884−1897. [Yao Yubi, Zhang Qiang, Li Yaohui, et al. Drought risk assessment technological progresses and problems[J]. Resources Science, 2013, 35(9): 1884−1897.]

[30] Mumtaz R, Baig S, Fatima I. Analysis of meteorological variations on wheat yield and its estimation using remotely sensed data: A case study of selected districts of Punjab Province, Pakistan (2001—2014)[J]. Italian Journal of Agronomy, 2017, 12(3): 254−270.

[31] Nyvall J. Soil water storage capacity and available soil moisture[J]. British Columbia, Ministry of Agriculture, Food and Fisheries, 2002, 4(619): 2−5.

[32] Parc. National agro-ecological resources database (Vol. Version 1.1): Natural resources division[R]. Islamabad: Pakistan Agricultural Research Council, 2009.

[33] Pds. Punjab development statistics 2011[R]. Lahore: Bureau of Statistics, Government of the Punjab, 2011.

[34] Mowp. Handbook on water statistics of Pakistan[M]. Islamabad: Ministry of Water and Power, Pakistan, 2012.

[35] Siddiqi A, Wescoat J L. Energy use in large-scale irrigated agriculture in the Punjab Province of Pakistan[J]. Water International, 2013, 38(5): 571−586.

[36] Tsakiris G D, Adnan S, Khan A H. Effective rainfall for irrigated agriculture plains of Pakistan[J]. Pakistan Journal of Meteorology, 2009(6): 61−72.

[37] Huang Y, Chen L, Fu B, et al. The wheat yields and water-use efficiency in the Loess Plateau: Straw mulch and irrigation effects[J]. Agricultural Water Management, 2005, 72(3): 209−222.

[38] Hao B Z, Xue Q W, Marek T H, et al. Soil water extraction, water use, and grain yield by drought-tolerant maize on the Texas High Plains[J]. Agricultural Water Management, 2015, 155: 11−21.

[39] Li S, Li Y, Li X, et al. Effect of straw management on carbon sequestration and grain production in a maize-wheat cropping system in Anthrosol of the Guanzhong Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 157: 43−51.

[40] Wang G, Liang Y, Zhang Q, et al. Mitigated CH_4 and N_2O emissions and improved irrigation water use efficiency in winter wheat field with surface drip irrigation in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2016, 163: 403−407.

[41] Mekonnen D K, Channa H, Ringler C. The impact of water users' associations on the productivity of irrigated agriculture in Pakistani Punjab[J]. Water International, 2015, 40(5−6): 733−747.

[42] 王春雨, 王军邦, 孙晓芳, 等. 孟印缅地区农田生产力脆弱性变化及气候影响机制——基于1982—2015年GIMMS3g植被指数[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 7793−7804. [Wang Chunyu, Wang Junbang, Sun Xiaofang, et al. Vulnerability of farmland productivity and climatic impact in Bangladesh, India, and Myanmar, based on GIMMS3g NDVI in 1982—2015[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): 7793−7804.]

[43] 赵健赟, 张波, 杨静. 基于GIMMS NDVI3g的青海高原植被分布特征研究[J]. 测绘工程, 2019, 28(5): 8−13. [Zhao Jianyun, Zhang Bo, Yang Jing. Engineering go surveying and mapping vegetationd is tribution characteristics of Qinghai Plateau based on GIMMS NDVI3g[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2019, 28(5): 8−13.]

Drought characteristics and its risk assessment across Pakistan

ZHU Shuzhen[1,2,3], HUANG Farong[1,2,4,5], LI Lanhai[1,2,3,4,5]

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. Ili Station for Watershed Ecosystem Research, Chinese Academy of Sciences, Xinyuan 835800, Xinjiang, China; 3. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 4. Key Laboratory of Water Cycle and Utilization in Arid Zone, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 5. Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: Pakistan is in South Asia (60°−80°N, 23°−37°E) with a total area of 88×10^4 km^2. The southeastern part of Pakistan is mountainous and hilly with a complex topography and different climate types. In summer, this area is controlled by subtropical high pressure, which results in hot and dry weather with a small amount of precipitation. The average annual rainfall is less than 250 mm, and a quarter of the area receives less than 120 mm. Because of the high summer temperatures, Pakistan has been greatly affected by long-term drought, which has severely restricted its social and economic development. In this study, we used the Global Inventory Modeling and Mapping Studies Normalized Difference Vegetation Index 3rd Generation (GIMMS NDVI3g) dataset from 1982 to 2013 to construct the vegetation condition index (VCI). We then used the VCI to analyze the range and frequency of drought in Pakistan for the past 32 years. The drought frequency was used to characterize the risk of drought based on sources from the Pakistan Statistics Bureau and reports in the literature. Information on livestock, soil, crops, and irrigation were used to evaluate the drought vulnerability, exposure, and disaster prevention and mitigation capabilities of Pakistan. Additionally, ERA-Interim data that had been verified by 10 meteorological stations in Pakistan were used for temperature and precipitation reanalysis. The influencing factors of the drought range were determined using partial correlation coefficients, and the partial least squares method was used to identify the dominant influencing factors for the spatial patterns of regional drought risk. The following results were obtained. (1) During the study period, the multiyear average drought range differed for each month. The drought range was larger from January to September than from September to December (area ratio was greater than 40%). The drought range was smaller from May to August (area ratio was less than 30%). The increase in temperature and decrease in precipitation from May to June caused the arid area to increase. (2) In the study area, the drought frequency was low from May to August. The frequency was higher in September for the woodlands and grasslands of the western mountainous areas. The frequency was higher in January and September than in December for the eastern plains. (3) The spatial pattern of drought risk was mainly determined by the drought frequency, crop yield, proportion of large livestock, and water storage capacity of the soil. Among these, the drought frequency had the highest impact on the regional drought risk. The livestock ratio and the water storage capacity of the soil indicated a higher drought risk in the transition zone from mountains to plains in the northern area and the southeastern area covered by natural vegetation. Irrigation reduced the drought risk in the valley area with flat terrain. Additionally, the natural vegetation in the northern mountainous area reduced the drought risk as well. In this study, we analyzed the long-term drought characteristics in Pakistan and evaluated the drought risk due to natural and human factors. This research can provide useful information for drought and disaster risk management in Pakistan.

Key words: drought; risk assessment; normalized difference vegetation index(NDVI); vegetation condition index(VCI); Pakistan